昆虫学报 *Acta Entomologica Sinica*，June 2008，51(6)：609 – 617 ISSN 0454-6296

桔小实蝇实验种群对敌百虫、高效氯氰菊酯和阿维菌素的抗性增长规律

潘志萍[1,2]**，陆永跃**[1]**，曾 玲**[1,*]**，曾鑫年**[1]

（1. 华南农业大学昆虫学系，广州 510642；2. 广东省昆虫研究所，广州 510260）

摘要：桔小实蝇 *Bactrocera doralis*（Hendel）是华南地区水果蔬菜上重要害虫，近年来暴发成灾，造成巨大的经济损失。使用化学杀虫剂是防治该虫的重要方法。在长期、频繁接触杀虫剂条件下该虫的抗药性产生、发展规律等问题值得深入研究。本文采用 LC_{50}、LC_{80-90} 两种剂量汰选成虫、幼虫，研究了桔小实蝇对敌百虫、高效氯氰菊酯和阿维菌素 3 种药剂的抗性增长规律。通过不接触药剂继代饲养获得了对 3 种杀虫剂的敏感品系，建立了毒力回归方程，明确了毒力敏感基线 LC_{50} 分别为 1.6024 mg/L，3.0964 mg/L 和 0.6074 mg/L。不同药剂种类、不同汰选方式时桔小实蝇的抗药性发展速度是不同的。以成虫死亡率 50%左右作为选择压力，桔小实蝇对敌百虫的抗性发展最快，汰选至 14 代抗性增长至 84.6 倍；其次是高效氯氰菊酯，抗性增长至 27.1 倍；而对阿维菌素的抗性仅上升至 7.7 倍。在成虫和幼虫 80% ~ 90%死亡率左右的选择压力下，桔小实蝇对高效氯氰菊酯的抗性发展最快，汰选 14 代后抗性增长至 125.4 倍；其次是敌百虫，抗性增大至 49.9 倍；对阿维菌素抗性增长相对较缓慢，11 代后为 17.9 倍。在成虫 80% ~ 90%死亡率左右的选择压力下，汰选 14 代、14 代、11 代后桔小实蝇对高效氯氰菊酯、敌百虫、阿维菌素分别增大至 58.7 倍、37.6 倍、11.9 倍。对成虫、幼虫均进行汰选桔小实蝇抗药性发展更快。建立了不同汰选方式时桔小实蝇实验种群汰选代数与对 3 种杀虫剂的抗性程度之间的关系方程，其中高效氯氰菊酯、敌百虫处理符合韦布尔曲线模型，阿维菌素处理符合幂曲线方程。

关键词：桔小实蝇；敌百虫；高效氯氰菊酯；阿维菌素；毒力；抗性

中图分类号：S441^{+}.4 **文献标识码**：A **文章编号**：0454-6296(2008)06-0609-09

Development of resistance to trichlorophon，alphamethrin，and abamectin in laboratory populations of the oriental fruit fly，*Bactrocera dorsalis*（Hendel）（Diptera：Tephritidae）

PAN Zhi-Ping[1,2]，LU Yong-Yue[1]，ZENG Ling[1,*]，ZENG Xin-Nian[1]（1. Department of Entomology，South China Agricultural University，Guangzhou 510642，China；2. Guangdong Entomological Institute，Guangzhou 510260，China）

Abstract：The oriental fruit fly，*Bactrocera dorsalis*（Hendel）is an important pest on fruits and vegetables of southern China. It caused huge economic losses in recent years. The use of chemical pesticides have been the important means for controlling the pest. The resistance emergence and development for *B. dorsalis* in the long-term and frequent exposure to pesticides were worthy of in-depth study. In this study，two dosages of LC_{50} and LC_{80-90} were employed to the adult and the larva for selecting resistant strains to trichlorophon，alphamethrin and abamectin，and the growth of resistance to the three insecticides were studied. Sensitive strains to the three insecticides were obtained through continuous breeding without contact of the insecticides，and toxicity regression equation were established. The sensitive baseline toxicity LC_{50} of the three insecticides were 1.6024 mg/L，3.0964 mg/L，and 0.6074 mg/L，respectively. Different resistance of *B. dorsalis* developed depending on different pesticide types and selection approaches. The resistance to trichlorophon was

---

基金项目：广东省科技计划项目(2004A20401002)；农业部项目(农植保字[2006]003 号)

作者简介：潘志萍，女，1975 生，博士，从事昆虫生态学与害虫控制方面的研究，E-mail：pzppan@scau.edu.cn

* **通讯作者** Author for correspondence，E-mail：zengling@scau.edu.cn

收稿日期 Received：2007-09-21；**接受日期** Accepted：2008-05-12

the highest in three insecticides when using 50% dose-mortality of adult population as a selected pressure, the resistance increased 84.6-fold after treatment for fourteen generations, the resistance to alphamethrin increased 27.1-fold, while the resistance to abamectin only increased 7.7-fold. When 80% - 90% dose-mortality to the adults and the larvae was applied, the resistance to alphamethrin increased 125.4-fold, the resistance of trichlorophon increased 49.9-fold after fourteen generations, while the resistance to abamectin increased comparatively slowly 17.9-fold after eleven generations. When 80% - 90% dose-mortality to the adults was applied, the resistance to alphamethrin, trichlorophon and abamectin increased 58.7-fold, 37.6-fold, 11.9-fold, respectively. The resistance of *B. dorsalis* developed the fastest in both the adults and the larvae treated with pesticides. Under different selections and based on the extent of the relationship of experimental population of *B. dorsalis* and three kinds of pesticides, the resistance equations were established, of which alphacypermethrin and trichlorfon treatment curves conform to Weibull model, while abamectin treatment curve conforms to the power curve equation.

Key words: *Bactrocera dorsalis*; trichlorophon; alphamethrin; abamectin; toxicity; resistance

桔小实蝇 *Bactrocera dorsalis* (Hendel)是亚太地区热带、亚热带水果、蔬菜上的一种重要害虫,在我国台湾、海南、云南、四川、贵州、广西、广东、福建等地均有发生分布(赵又新和明月,1986;李文蓉,1988)。但是,除在台湾一直发生较严重外,直至20世纪90年代初期华南海南、广东、广西、云南和四川南部等局部地区该虫发生危害较轻(李文蓉,1988;梁广勤等,1993)。90年代末以来该虫在华南局部地区暴发成灾,严重威胁水果蔬菜的安全生产(林进添等,2004;黄素青和韩日畴,2005)。目前,该虫从我国南部不断向北扩展蔓延,其适生范围可能包括长江流域部分省区,而在上海局部地区已经暴发危害(侯柏华和张润杰,2005;周国梁等,2006)。监测资料显示,至2006年除海南、广东、广西、云南、贵州、四川、福建、台湾、香港、澳门等省区外,湖南、湖北、江西、浙江、上海、江苏、西藏等地区也均已经发现桔小实蝇发生危害。

为控制桔小实蝇为害,台湾从上个世纪50~70年代对该虫生物学、生态学、发生规律、控制技术等进行了较多的研究,曾于1975~1985年在全岛果园区域开展了以释放不育雄蝇技术为主的综合防治技术,并取得了良好的防治效果(李文蓉,1988)。大陆从1990年代末开始对该虫发生规律、监测与控制技术等开展了系统研究,形成了以使用化学农药为主的防治管理体系(李红旭等,2000;梁广勤等,2003;林进添等,2005;袁盛勇等,2005;许益镌等,2005;任璐等,2006;于鑫等,2006)。大面积、大剂量、高频次的使用化学杀虫剂致使桔小实蝇产生了明显抗性。2003~2006年华南地区该虫已对敌百虫、高效氯氰菊酯和阿维菌素产生了抗性,部分地区甚至达到了中、高抗水平(潘志萍等,2005;章玉苹等,2007)。关于化学杀虫剂对该虫的毒力以及该虫抗药性现状及其机理已有一些研究(Busvine,1980;Hsu and Feng,2006;许如君和冯海东,2000,2002;Hsu *et al*.,2004,2006;许如君等,2004;潘志萍等,2006;章玉苹等,2007)。通过培育实验种群抗性,研究害虫对化学杀虫剂的抗性增长规律,能为预测害虫的抗药性发展趋势、探讨其抗性机制、制订害虫防治和抗性治理中合理使用药剂策略等提供科学依据。在昆虫对药物的抗性选育中一般采用连续多代汰选的方法,所用药剂剂量一般为 LC_{50},或 LC_{90}、LC_{95}(Busvine,1980;程環峡等,1998)。本文采用 LC_{50}、LC_{80-90} 两种剂量汰选成虫、幼虫,研究了桔小实蝇对敌百虫、高效氯氰菊酯和阿维菌素等药剂的抗性增长规律,以期为该虫的抗药性产生、发展趋势预测等提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试虫源

以采集于清远郊区和广州市郊区果园的桔小实蝇野外种群作为敏感品系培育和抗性品系筛选的原始虫源材料,置于养虫室内继代饲养。

1.2 供试药剂及主要仪器

供试药剂及生产厂家情况如下:90%敌百虫原粉,江苏南通江山农药化工股份有限公司;95%高效氯氰菊酯原粉,广东立威化工有限公司;90%阿维菌素原粉,深圳瑞德丰有限公司。点滴法中使用的不锈钢毛细管点滴器用薄层扫描仪定容。

1.3 敏感品系培育方法

根据对桔小实蝇不同地理种群抗药性测定的结果(潘志萍等,2005),选择对敌百虫、高效氯氰菊酯和阿维菌素敏感性较高的的清远种群作为敏感品系培育的原始虫源,在不接触农药条件下幼虫用香蕉、成虫用酵母和水继代饲养。每隔 3 代取部分成虫,采用药膜法测定 1 次 3 种药剂对成虫的毒力,并建立毒力回归线。经多代后,以药剂对实蝇的毒力基本稳定时的毒力水平作为桔小实蝇对上述 3 种药剂的毒力敏感基线。

1.4　抗性品系选育方法

将采集的桔小实蝇虫源置于养虫室内饲养 1 ~ 2 代,待稳定后,采用药膜法测定敌百虫、高效氯氰菊酯和阿维菌素对亲代(F_0)成虫的毒力基线。此后各代,采用群体筛选法以点滴法和药膜法使用不同药剂浓度处理幼虫、成虫,筛选出不同的抗药性品系。对成虫、幼虫阶段进行 3 种组合处理:

处理 1:开始的 5 代用 F_0 代的 LC_{50} 浓度药剂对 F_1 ~ F_5 代成虫进行筛选,继续饲养存活的个体,测定药剂对 F_5 代幼虫、成虫的毒力。从 F_6 代开始,除用当代成虫的 LC_{50} 浓度药剂处理以后 3 代成虫外,还用幼虫的 LC_{50} 浓度药剂处理以后 3 代幼虫,直至 F_{14} 代止。F_6 ~ F_{14} 代每隔 3 代测定 1 次药剂对成虫的毒力。

处理 2:筛选过程与处理 1 相近,差别是各代成虫期筛选药剂浓度为 LC_{80} ~ LC_{90}、幼虫期不用药剂处理。

处理 3:筛选过程与处理 1 相同,差别是对成虫、幼虫的筛选药剂浓度为 LC_{80} ~ LC_{90}。

1.5　毒力测定方法

成虫采用药膜法、幼虫采用微量点滴法进行药剂处理。

(1)药膜法:将供试药剂用丙酮完全溶解、配制成母液,取出母液与丙酮混合、稀释成 5 ~ 6 个浓度药液。将药液分别倒入 250 mL 三角瓶中,轻轻转动三角瓶使药液在瓶壁上形成均匀药膜后弃去药液。待丙酮完全挥发后把健康、羽化 3 ~ 5 d 成虫引入三角瓶中,将含有 5% 蜜糖水的棉球置于瓶口,以纱布封住瓶口并用橡皮圈扎紧后将瓶子倒立放置。设丙酮处理作为对照。每个浓度处理 10 头,重复 3 次。24 h 后观察记录死亡虫数,以用毛笔将成虫翻身后 30 s 内不能翻转视为死亡。对照组死亡率在 10% 以下为有效试验。室温为 25 ~ 28℃。

(2)微量点滴法:取健康 3 龄幼虫,用容量范围为 0.04 ~ 0.05 μL 不锈钢毛细管点滴器将配制好的药液逐头点滴于幼虫胸部背面。将处理后的幼虫放入湿润的沙中,并置于温度 25 ~ 28℃、光照周期 16L:8D 的温室中继续培养。

1.6　毒力计算方法

试验数据用 EXCEL 统计软件处理,获得药剂毒力回归方程,致死中浓度 LC_{50} 及其 95% 置信度,以及相关系数 r 等相关参数。其中,抗性倍数 = 选育后种群 LC_{50}/敏感种群 LC_{50}。以 LC_{50} 的 95% 置信限是否有重叠作为判断不同代次间药剂敏感度差异是否显著的标准。抗性水平参照对家蝇的抗性划分标准进行区分:< 3 倍为敏感;5 ~ 10 倍为低水平抗性;10.1 ~ 40 倍为中等抗性;40.1 ~ 160 倍为高水平抗性;> 160 倍为极高水平抗性(唐振华,1993)。

2　结果与分析

2.1　桔小实蝇对 3 种杀虫剂敏感品系的建立

从表 1 可以看出,在不接触药剂繁殖 14 代过程中,敌百虫、高效氯氰菊酯和阿维菌素对桔小实蝇实验种群成虫的 LC_{50} 除了 F_0 ~ F_4 有所下降外,F_4 ~ F_{14} 代变化不大,即对药剂的敏感性保持基本稳定。从所建立的毒力回归方程可知,繁殖 14 代后方程 b 值一般均较大,F_{14} 代时敌百虫、高效氯氰菊酯和阿维菌素毒力回归方程 b 值分别为 5.82,6.24,5.67。这说明 F_{14} 代实验群体中敏感纯合个体占种群比例较大,可以认为该品系对敌百虫、高效氯氰菊酯和阿维菌素是敏感的。因此,本研究中抗性品系的抗性程度确定均以 F_{14} 代的 LC_{50} 值 1.6024 mg/L,3.0964 mg/L,0.6074 mg/L 为毒力基线。

2.2　桔小实蝇对敌百虫的抗性增长规律

表 2 表明,3 种处理方式汰选,桔小实蝇对敌百虫的抗性均随着选育代数的增加而逐渐增大。例如,用 LC_{50} 处理成虫与幼虫相结合的方式筛选,敌百虫对桔小实蝇 F_0,F_5,F_8,F_{11},F_{14} 成虫的 LC_{50} 分别为 3.75,8.51,50.35,121.67,135.49 mg/L,其抗性倍数分别达到 2.3,5.3,31.4,75.9,84.6,汰选 5 代即出现了低水平抗性,8 代后抗药性处于中等水平,11 ~ 14 代达到了高抗水平。

表 1　桔小实蝇实验种群不同代次成虫对 3 种杀虫剂敏感性

Table 1　Susceptibility of adults of *Bactrocera dorsalis* to three insecticides in different generations

杀虫剂 Insecticides	选育世代 Generation treated	毒力回归方程 LC-P line	致死中浓度 LC_{50} (mg/L)	相关系数 r
敌百虫 Trichlorophon	F_0	$y = 2.6461 + 7.6609x$	2.0289 (1.7900 – 2.2900)	0.9788
	F_4	$y = 2.9070 + 7.7793x$	1.8580 (1.6500 – 2.0900)	0.9564
	F_8	$y = 2.6898 + 8.5626x$	1.8613 (1.6700 – 2.0800)	0.9724
	F_{11}	$y = 2.8039 + 8.0937x$	1.8678 (1.6700 – 2.0900)	0.9900
	F_{14}	$y = 3.8072 + 5.8250x$	1.6024 (1.3800 – 1.8600)	0.9815
高效氯氰菊酯 Alphamethrin	F_0	$y = 3.1243 + 3.0173x$	4.1846 (3.1000 – 5.6500)	0.9976
	F_4	$y = 2.2606 + 5.3067x$	3.2826 (2.6900 – 4.0100)	0.9638
	F_8	$y = 1.9561 + 5.9198x$	3.2629 (2.7200 – 3.9200)	0.9831
	F_{11}	$y = 2.0119 + 5.6388x$	3.3378 (2.8400 – 4.0400)	0.9857
	F_{14}	$y = 1.9365 + 6.2412x$	3.0964 (2.6800 – 3.5700)	0.9512
阿维菌素 Abamectin	F_0	$y = 5.2163 + 1.6477x$	0.7391 (0.4300 – 1.2600)	0.9647
	F_4	$y = 6.0695 + 5.6083x$	0.6446 (0.5400 – 0.7800)	0.9215
	F_8	$y = 5.9749 + 5.0474x$	0.6410 (0.5200 – 0.7800)	0.9773
	F_{11}	$y = 5.9073 + 5.1817x$	0.6682 (0.5600 – 0.8000)	0.9416
	F_{14}	$y = 6.2278 + 5.6700x$	0.6074 (0.5200 – 0.7100)	0.9653

表 2　桔小实蝇不同代次成虫对敌百虫的抗药性

Table 2　Resistance of adults of *Bactrocera dorsalis* to trichlorophon in different generations

处理类型 Resistance selection type	选育代数 Generation treated	毒力回归方程 LC-P line	致死中浓度 LC_{50} (95% CL) (mg/L)	相关系数 r	抗性倍数 R/S
LC_{50}**处理成虫＋幼虫** Adults and larvae treated by LC_{50}	F_0	$y = 2.8577 + 3.7304x$	3.7520 (3.2733 – 4.3007)	0.9885	2.3
	F_5	$y = 2.0494 + 3.1722x$	8.5142 (6.3843 – 11.3546)	0.9516	5.3
	F_8	$y = -6.7862 + 6.9248x$	50.3537 (31.3500 – 78.6100)	0.9883	31.4
	F_{11}	$y = -1.0373 + 2.8953x$	121.6741 (87.9200 – 168.4000)	0.9798	75.9
	F_{14}	$y = 0.9795 + 1.8859x$	135.4904 (85.4600 – 214.8100)	0.9711	84.6
LC_{80-90}**处理成虫** Adults treated by LC_{80-90}	F_0	$y = 2.8577 + 3.7304x$	3.7520 (3.2733 – 4.3007)	0.9885	2.3
	F_5	$y = -1.1150 + 3.8272x$	39.6073 (31.2100 – 47.6300)	0.9710	24.7
	F_8	$y = -1.4583 + 3.9007x$	45.2572 (36.1732 – 56.6226)	0.9817	28.2
	F_{11}	$y = -1.5023 + 3.8713x$	47.8193 (37.1076 – 61.6231)	0.9630	29.8
	F_{14}	$y = -1.6304 + 3.7250x$	60.2523 (47.4498 – 76.5091)	0.9659	37.6
LC_{80-90}**处理成虫＋幼虫** Adults and larvae treated by LC_{80-90}	F_0	$y = 2.8577 + 3.7304x$	3.7520 (3.2733 – 4.3007)	0.9885	2.3
	F_5	$y = -1.1150 + 3.8272x$	39.6073 (31.2100 – 47.6300)	0.9710	24.7
	F_8	$y = -0.9860 + 3.3669x$	59.9669 (46.1714 – 77.8844)	0.9910	37.4
	F_{11}	$y = -0.4268 + 3.0501x$	60.1532 (42.9458 – 84.2554)	0.9899	37.5
	F_{14}	$y = -0.3079 + 2.7896x$	79.9315 (58.6568 – 108.9223)	0.9843	49.9

不同处理方式桔小实蝇对敌百虫抗性的增长规律所差异，主要差异是LC_{50}处理成虫与幼虫汰选中开始几代桔小实蝇抗性增长缓慢，$F_5 \sim F_{11}$代快速增长，F_8代后抗性明显较高，F_{11}代后抗性增长变缓，并出现高水平抗性。而LC_{80-90}处理成虫、LC_{80-90}处理成虫＋幼虫中抗性增长速度相对缓慢，汰选14代后种群抗性水平相对较低。如LC_{50}处理成虫＋幼虫，F_{14}代致死中浓度为135.49 mg/L，抗性倍数分别为84.6，而LC_{80-90}处理成虫、LC_{80-90}处理成虫＋幼虫致死中浓度、抗性倍数分别为60.25 mg/L、37.6倍和79.93 mg/L、49.9倍。由此可见，不同敌百虫选择压力下桔小实蝇实验种群抗药性产生、发展方式是不同的，低选择压力下如LC_{50}处理成虫＋幼虫该虫抗性发展相对较快。

经分析，3个处理中敌百虫对桔小实蝇致死中浓度、桔小实蝇对敌百虫的抗性与选育代数间均存在显著关系。以选育代数为自变量，LC_{50}值、抗性倍数为因变量，建立桔小实蝇对敌百虫抗性品系的抗性发展趋势拟合方程（表3）。结果显示，无论用LC_{50}汰选或LC_{80-90}汰选的敌百虫抗性品系，在室内筛选至第14代时桔小实蝇的抗性发展规律均符合韦布尔曲线模型。

表3　桔小实蝇对敌百虫的抗性与选育代数间关系模型

Table 3　Models of the relationship between the generations treated and resistance to trichlorophon for *Bactrocera dorsalis*

处理类型 Resistance selection type	参数 Parameters	模型 Models	决定系数 R^2	显著水平 P
LC_{50}处理成虫＋幼虫	选育代数-LC_{50} Generation-LC_{50}	$y=137.83/(1+e^{7.12-0.82x})$	0.9994	0.0013
Adults and larvae treated by LC_{50}	选育代数-抗性倍数 Generation-Fold	$y=86.06/(1+e^{7.12-0.82x})$	0.9994	0.0012
LC_{80-90}处理成虫	选育代数-LC_{80-90} Generation-LC_{80-90}	$y=53.26/(1+e^{2.08-0.58x})$	0.9714	0.0564
Adults treated by LC_{80-90}	选育代数-抗性倍数 Generation-Fold	$y=33.20/(1+e^{2.08-0.58x})$	0.9711	0.0570
LC_{80-90}处理成虫＋幼虫	选育代数-LC_{80-90} Generation-LC_{80-90}	$y=74.28/(1+e^{2.19-0.44x})$	0.9765	0.0465
Adults and larvae treated by LC_{80-90}	选育代数-抗性倍数 Generation-Fold	$y=46.35/(1+e^{2.20-0.44x})$	0.9762	0.0469

2.3　桔小实蝇对高效氯氰菊酯的抗性增长规律

汰选不同代次后桔小实蝇成虫对高效氯氰菊酯的抗药测定结果见表4。3种汰选方式中，桔小实蝇对高效氯氰菊酯的抗性均表现为随着选育代数的增加而先迅速增大，后增速减缓的规律。例如，用LC_{80-90}处理成虫＋幼虫方式筛选，F_0，F_5，F_8代时高效氯氰菊酯对桔小实蝇成虫的LC_{50}迅速增大，由3.22 mg/L分别增至22.09 mg/L、325.00 mg/L，F_8代后LC_{50}呈缓慢增长趋势，即由F_8的325.00 mg/L分别增大到F_{11}、F_{14}的365.39 mg/L，388.38 mg/L。其各代抗性水平的增长也表现为同样的规律，F_0，F_5，F_8，F_{11}，F_{14}时分别为1.0，7.1，105.0，118.0，125.4倍，即汰选5代出现低水平抗性，而8代后达到了高水平抗性。

与敌百虫品系类似，采取高效氯氰菊酯不同汰选方式时桔小实蝇实验种群抗药性产生速度、抗性水平是有明显差异的。与LC_{80-90}处理成虫＋幼虫汰选方式相比，LC_{50}处理成虫＋幼虫、LC_{80-90}处理成虫2种方式中桔小实蝇品系对高效氯氰菊酯抗性增长速度较慢，且最终抗性程度明显较低。如汰选到F_8代时LC_{80-90}处理成虫＋幼虫方式时LC_{50}为325.00 mg/L，抗性倍数为105.0倍，LC_{80-90}处理成虫、LC_{50}处理成虫＋幼虫方式中LC_{50}、抗性倍数则较低，分别为121.96 mg/L、39.4和为58.32 mg/L、18.8倍。F_{14}时3种方式培育出的抗性品系的抗性水平差异很大，由高到底依次为LC_{80-90}处理成虫＋幼虫、LC_{80-90}处理成虫、LC_{50}处理成虫＋幼虫，抗性倍数分别为125.4倍、58.7倍、27.1倍。

表4　桔小实蝇不同代次成虫对高效氯氰菊酯的抗药性

Table 4　Resistance of adults of *Bactrocera dorsalis* to alphamethrin in different generations

处理类型 Resistance selection type	选育代数 Generation treated	毒力回归方程 LC-P line	致死中浓度 LC_{50} (95% CL) (mg/L)	相关系数 r	抗性倍数 R/S
LC_{50}处理成虫＋幼虫	F_0	$y=2.4869+4.9495x$	3.2192 (2.8353－3.6550)	0.9910	1.0
Adults and larvae	F_5	$y=2.1825+2.0757x$	22.7713 (7.8500－64.6000)	0.9794	7.4
treated by LC_{50}	F_8	$y=-2.7563+4.3924x$	58.3239 (47.6610－71.3724)	0.9858	18.8
	F_{11}	$y=-2.2034+3.8331x$	75.7268 (60.0966－95.4222)	0.9952	24.5
	F_{14}	$y=-1.5245+3.3905x$	84.0185 (64.9813－108.6311)	0.9780	27.1
LC_{80-90}处理成虫	F_0	$y=2.4869+4.9495x$	3.2192 (2.8353－3.6550)	0.9910	1.04
Adults treated by LC_{80-90}	F_5	$y=2.1825+2.0757x$	22.0883 (14.7090－33.1698)	0.9826	7.1
	F_8	$y=-0.1568+2.4718x$	121.9561 (80.4200－184.9500)	0.9639	39.4
	F_{11}	$y=-9.5339+6.4837x$	174.4247 (150.6500－201.9600)	0.9703	56.3
	F_{14}	$y=-8.6581+6.0453x$	181.6685 (156.4200－210.9900)	0.9556	58.7
LC_{80-90}处理成虫＋幼虫	F_0	$y=2.4869+4.9495x$	3.2192 (2.8353－3.6550)	0.9910	1.0
Adults and larvae	F_5	$y=2.1825+2.0757x$	22.0883 (14.7090－33.1698)	0.9826	7.1
treated by LC_{80-90}	F_8	$y=-0.2026+2.7971x$	324.9950 (271.3400－387.7200)	0.9844	105.0
	F_{11}	$y=-13.9795+7.4059x$	365.3858 (322.4600－414.0300)	0.9806	118.0
	F_{14}	$y=-13.0247+6.9613x$	388.3828 (313.9500－478.5800)	0.9442	125.4

与敌百虫品系相比较，桔小实蝇对高效氯氰菊酯更易产生抗性，且抗性更强；不同的是，使用高效氯氰菊酯进行汰选，当选择压力越高时桔小实蝇产生抗性的速度越快、抗性水平越高。

与桔小实蝇对敌百虫抗性增长规律相近，高效氯氰菊酯对桔小实蝇的致死中浓度、桔小实蝇对高效氯氰菊酯的抗性与选育代数间也存在明确的数量

关系。以汰选代数为自变量，LC_{50} 值为因变量，或以汰选代数为自变量，抗性倍数为因变量，对桔小实蝇汰选代数与对高效氯氰菊酯的抗性关系进行拟合，构建的 6 个模型见表 5。由该表可见，随着选育代数的变化，LC_{50} 值、抗性倍数变化均符合韦布尔曲线模型，即呈现缓慢-快速-缓慢增长的规律。

表 5　桔小实蝇对高效氯氰菊酯的抗性与选育代数间关系模型

Table 5　Models of the relationship between the generations treated and resistance to alphamethrin for *Bactrocera dorsalis*

处理类型 Resistance selection type	参数 Parameters	模型 Models	决定系数 R^2	显著水平 P
LC_{50} 处理成虫＋幼虫	选育代数-LC_{50} Generation-LC_{50}	$y = 84.34/(1 + e^{3.75 - 0.56x})$	0.9992	0.0017
Adults and larvae treated by LC_{50}	选育代数-抗性倍数 Generation-Fold	$y = 27.24/(1 + e^{3.74 - 0.56x})$	0.9993	0.0014
LC_{80-90} 处理成虫	选育代数-LC_{80-90} Generation-LC_{80-90}	$y = 181.33/(1 + e^{6.41 - 0.89x})$	0.9998	0.0004
Adults treated by LC_{80-90}	选育代数-抗性倍数 Generation-Fold	$y = 58.56/(1 + e^{6.42 - 0.89x})$	0.9998	0.0004
LC_{80-90} 处理成虫＋幼虫	选育代数-LC_{80-90} Generation-LC_{80-90}	$y = 377.33/(1 + e^{10.40 - 1.53x})$	0.9991	0.0018
Adults and larvae treated by LC_{80-90}	选育代数-抗性倍数 Generation-Fold	$y = 121.84/(1 + e^{10.42 - 1.53x})$	0.9991	0.0018

2.4　桔小实蝇对阿维菌素的抗性增长规律

阿维菌素对桔小实蝇成虫的毒力测定结果见表 6。桔小实蝇对阿维菌素的抗药性发展速度较为缓慢，且不同汰选方式处理之间桔小实蝇对阿维菌素的抗药性增强程度不同，以 LC_{80-90} 浓度处理成虫＋幼虫方式产生的抗性最强，其次是 LC_{80-90} 处理成虫的品系，LC_{50} 处理成虫＋幼虫品系抗性程度最低。例如，LC_{80-90} 处理成虫＋幼虫品系、LC_{50} 处理成虫＋幼虫品系抗性一直保持增长，LC_{80-90} 浓度处理成虫品系对阿维菌素抗性开始发展较快，F_8 代抗性有所降低，F_{11} 代抗性上升。用 LC_{50} 浓度阿维菌素处理成虫＋幼虫进行选育，选育到 F_{11} 后抗性增大到原来的 7.7 倍，已产生了低水平抗药性；用 LC_{80-90} 浓度药液处理成虫和 LC_{80-90} 浓度药液处理成虫＋幼虫 2 种方式，F_{11} 代抗性分别是敏感品系的原来的 11.9 倍和 17.9 倍，已达到中等水平抗药性。

结果表明，与高效氯氰菊酯相近，当阿维菌素选择压力越大，桔小实蝇抗性上升得越快，尽管某段时期抗性可能衰退，抗药性总体仍然缓慢增长。但与高效氯氰菊酯、敌百虫两种杀虫剂相比，桔小实蝇对阿维菌素的抗性增长速度相对较为缓慢。

与高效氯氰菊酯、敌百虫不同的是，桔小实蝇对阿维菌素抗性水平与选育代数间关系表现为幂函数形式（表 7），在汰选的代数内桔小实蝇对对阿维菌素抗性仍处于快速增长的阶段。

表 6　桔小实蝇不同代次成虫对阿维菌素的抗药性

Table 6　Resistance of adults of *Bactrocera dorsalis* to abamectin in different generations

处理类型 Resistance selection type	选育代数 Generation treated	毒力回归方程 LC-P line	致死中浓度 LC_{50} (95% CL) (mg/L)	相关系数 r	抗性倍数 R/S
LC_{50} 处理成虫＋幼虫 Adults and larvae treated by LC_{50}	F_0	$y = 5.3851 + 1.9101x$	0.6298(0.4773 – 0.8312)	0.9711	1.0
	F_5	$y = 4.1807 + 3.3364x$	1.7630(1.3543 – 2.2878)	0.9827	2.9
	F_8	$y = 3.4294 + 2.8424x$	3.5691(2.6243 – 4.8539)	0.9712	5.9
	F_{11}	$y = 3.3879 + 2.4155x$	4.6493(2.9481 – 7.3321)	0.9659	7.7
LC_{80-90} 处理成虫 Adults treated by LC_{80-90}	F_0	$y = 5.3851 + 1.9101x$	0.6298(0.4773 – 0.8312)	0.9711	1.0
	F_5	$y = 2.6200 + 3.7812x$	4.2601(3.3500 – 5.4200)	0.9962	7.0
	F_8	$y = 5.3851 + 1.9101x$	3.4914(3.1400 – 4.5800)	0.9877	5.7
	F_{11}	$y = 2.2199 + 3.2337x$	7.2400(5.4400 – 9.6354)	0.9572	11.9
LC_{80-90} 处理成虫＋幼虫 Adults and larvae treated by LC_{80-90}	F_0	$y = 5.3851 + 1.9101x$	0.6298(0.4773 – 0.8312)	0.9711	1.0
	F_5	$y = 2.6200 + 3.7812x$	4.2601(3.3500 – 5.4200)	0.9962	7.0
	F_8	$y = 1.8463 + 3.3419x$	8.7496(6.7606 – 11.3238)	0.9859	14.4
	F_{11}	$y = 1.1142 + 3.7533x$	10.8466(8.6054 – 13.6716)	0.9388	17.9

3　讨论

敏感品系和抗性品系的获取是害虫抗药性研究的基础工作，对于研究抗性发展规律和制订抗性治理策略是非常必要的。敏感毒力基线是评价抗性发展水平的依据，而敏感品系的获得是建立敏感基线的基础。敏感品系和抗性品系均可由田间采集或室

内培育获得。本文获得的敏感品系是在不接触农药的基础上，进行人工饲养繁殖多代，建立起来的实验品系；而抗性品系是用药剂多代筛选建立起来。如何快速培养敏感品系和高水平的抗性品系，不仅为抗性的基础理论提供了模型，而且可在抗性品系的选育过程中了解抗性产生、发展的趋势，为防治害虫提供一定的理论依据。

表7　桔小实蝇对阿维菌素的抗性与选育代数间关系模型

Table 7　Models of the relationship between the generations treated and resistance to abamectin for *Bactrocera dorsalis*

处理类型 Resistance selection type	参数 Parameters	模型 Models	决定系数 R^2	显著水平 P
LC_{50}处理成虫+幼虫	选育代数-LC_{50} Generation-LC_{50}	$y = 0.311x^{1.137}$	0.9479	0.0264
Adults and larvae treated by LC_{50}	选育代数-抗性倍数 Generation-Fold	$y = 0.507x^{1.144}$	0.9517	0.0245
LC_{80-90}处理成虫	选育代数-LC_{80-90} Generation-LC_{80-90}	–		
Adults by LC_{80-90}	选育代数-抗性倍数 Generation-Fold	–		
LC_{80-90}处理成虫+幼虫	选育代数-LC_{80-90} Generation-LC_{80-90}	$y = 0.852x^{1.074}$	0.9770	0.0116
Adults and larvae treated by LC_{80-90}	选育代数-抗性倍数 Generation-Fold	$y = 1.387x^{1.079}$	0.9778	0.0111

“–”表示参数间关系不符合模型。“–”means the parameters of the relationship do not meet the model.

对桔小实蝇敏感品系的监测结果表明（表1），敏感品系的敏感性上升是前快后慢，在室内连续饲养4代后，对敌百虫、高效氯氰菊酯和阿维菌素的敏感性有所提高，此后$F_5 \sim F_{14}$代期间对上述3种农药敏感性变化平稳。这种采自清远的桔小实蝇种群经14代培育后，敏感基因的纯合个体在种群中所占比例上升，而且敏感基因频率较高，对药剂的敏感性也较高，因此可认为已获得了对这3种药剂敏感的品系。

通过对抗性品系的筛选试验，不同药剂、不同剂量和不同处理对桔小实蝇的抗性选育产生了不同的结果。综合室内对桔小实蝇抗性选育的研究结果可以得出一个结论，即桔小实蝇对敌百虫、高效氯氰菊酯产生抗性的速度较快，而对阿维菌素产生抗性的速度相对较慢。从不同处理结果来看，幼虫点滴处理比幼虫不做点滴处理的抗性产生得更快。从控制田间种群数量的效果看，以实蝇成虫为防治目标效果明显高于以幼虫和蛹为靶标的措施，因此在防治桔小实蝇过程中，要以成虫作为防治目标，避免在幼虫和蛹的盛发期施药，减少药剂对害虫的选择压力，避免或延缓抗药性的产生。

药剂的选择压力对抗性的形成至关重要，并非选择压力大抗性的增长就快。一些研究表明，敏感种群繁殖力高，而抗药性种群的生物学特性有所改变，其繁殖力较低，因此高抗群体竞争能力不及低抗群体，当这两种群体共存时，由于低抗群体数量多，而且世代历期短，高抗群体很容易被低抗群体吸收同化，使实际中害虫的抗药性保持在一定的水平，而不会在短期达到极高的抗药性（唐振华等，2000）。因此，在高剂量药剂的作用下，低抗群体与高抗群体子代的数量都会剧减，这时敏感与抗性种群的生殖能力的差异对种群发展的作用就显得非常突出，低抗种群就会很快发展起来（胡兴强等，2003）。这有可能是在敌百虫LC_{50}且幼虫点滴筛选下产生的抗性比LC_{90}且幼虫点滴筛选下易产生高抗性水平的原因。

抗药性是化学防治中难以克服的问题，如果在防治中忽视科学用药，不仅造成大量的浪费，而且还会造成严重的环境污染和抗药性快速发展，也不利于后续防治措施发挥作用。室内筛选3种抗性品系的结果可作为桔小实蝇抗性预测的一个重要依据。对已产生抗性的桔小实蝇种群应及时采取适当措施，否则抗性就会迅速上升，尤其是在果园，对于抗有机磷类、菊酯类和阿维菌素的桔小实蝇种群处于突增阶段时，应予以足够重视，可采取使用抗性水平较低的杀虫剂来治理。对于对上述药剂已产生抗药性的地区，可推算药剂使用的间隔年限，从而能更好地保持其杀虫效果。因此，在生产上应用药剂防治桔小实蝇时，必须强调进行药剂的轮换使用，避免高剂量、连续单独使用某种药剂，防止或延缓田间桔小实蝇种群对药剂产生抗药性。

参考文献（References）

Busvine JR，1980. Recommended methods for the detection and measurement of resistance of agricultural pests to pesticides：method for tephritid fruit flies-FAO Method No. 20. *FAO Plant Protection Bulletin*，27：40–43.

Cheng JX，Zhu LH，Zhao TY，Dong YD，Yu H，Lu BL，1998. Selection of the resistant strains of *Culex pipiens pallens* to deltamethrin. *Chinese*

Journal of Vector Biology and Control，9(3)：180 – 182. [程環峡，朱礼华，赵彤言，董言德，于虹，陆宝麟，1998. 淡色库蚊对溴氰菊酯抗性株的选育. 中国媒介生物学及控制杂志，9(3)：180 – 182].

Hou BH，Zhang RJ，2005. Potential distributions of the fruit fly *Bactrocera dorsalis*（Diptera：Tephritidae）in China as predicted by CLIMEX. *Acta Ecologica Sinica*，25(7)：1 569 – 1 574. [侯柏华，张润杰，2005. 基于 CLIMEX 的桔小实蝇在中国适生区的预测. 生态学报，25(7)：1 569 – 1 574].

Hsu JC，Feng HT，2006. Development of resistance to spinosad in oriental fruit fly，*Bactrocera dorsalis*（Diptera：Tephritidae）in laboratory selection and cross-resistance. *Journal of Economic Entomology*，99：931 – 936.

Hsu JC，Feng HT，Wu WJ，2004. Resistance and synergistic effects of insecticides in *Bactrocera dorsalis*（Diptera：Tephritidae）in Taiwan. *Journal of Economic Entomology*，97(5)：1 682 – 1 688.

Hsu JC，Feng HT，2000. Insecticide susceptibility of the oriental fruit fly（*Bactrocera dorsalis*（Hendel））（Diptera：Tephritidae）in Taiwan. *Chinese Journal of Entomology*，20：109 – 118. [许如君，冯海东，2000. 台湾东方果实蝇（*Bactrocera dorsalis*（Hendel））（双翅目：果实蝇科）对杀虫剂的感受性. 中华昆虫，20：109 – 118].

Hsu JC，Feng HT，2002. Susceptibility of melon fly（*Bactrocera cucurbitae*）and oriental fruit fly（*B. dorsalis*）to insecticides in Taiwan. *Plant Protection Bulletin*，44：303 – 314. [许如君，冯海东，2002. 瓜实蝇及东方果实蝇对杀虫剂感受性现况. 植物保护学会会刊，44(4)：303 – 315].

Hsu JC，Haymerc DS，Wu WJ，Feng HT，2006. Mutations in the acetylcholinesterase gene of *Bactrocera dorsalis* associated with resistance to organophosphorus insecticides. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*，36：396 – 402.

Hsu JC，Wu WJ，Feng HT，2004. Biochemical mechanisms of malathion resistance in oriental fruit fly（*Bactrocera dorsalis*）. *Plant Protection Bulletin*，46(3)：255 – 266. [许如君，吴文哲，冯海东，2004. 东方果实蝇对马拉松的生化抗性机制探讨. 植物保护学会会刊，46(3)：255 – 266].

Hu XQ，Wu MS，Li RM，Zhang JL，Yu ZC，2003. Resistance tendency of housefly to phoxim. *Chinese Journal of Hygienic Insecticides of Equipments*，9(2)：10 – 14. [胡兴强，吴明生，李荣民，张家林，俞正楚，2003. 家蝇对辛硫磷抗性预测研究. 中华卫生杀虫药械，9(2)：10 – 14].

Huang SQ，Han RC，2005. Advance in the research on the quarantine pest *Bactrocera dorsalis*. *Entomological Knowledge*，42(5)：479 – 484. [黄素青，韩日畴，2005. 桔小实蝇的研究进展. 昆虫知识，42(5)：479 – 484].

Li HX，Ye H，Lu J，2000. On damages and distributions of fruit fly（*Bactrocera dorsalis* Hendel）in Yunnan Province，southern China. *Journal of Yunnan University*（*Natural Sciences Edition*），22(6)：473 – 475. [李红旭，叶辉，吕军，2000. 桔小实蝇在云南的危害与分布. 云南大学学报（自然科学版），22(6)：473 – 475].

Li WR，1988. The control of *Bactrocera dorsalis*（Hendel）. *Chinese Journal of Entomology*（*Special Publ.*），(2)：51 – 60. [李文蓉，1988. 东方果实蝇之防治. 中华昆虫（特刊），(2)：51 – 60].

Liang GQ，Liang GZ，Lin M，Liang F，1993. Fruit Fly and Its Control. Guangdong Science & Technology Press，Guangzhou. 93 – 104. [梁广勤，梁国真，林明，梁帆，1993. 实蝇及其防除. 广州：广东科技出版社. 93 – 104].

Liang GQ，Liang F，Wu JJ，Li HH，2003. The first report of the study on sterile treatment for oriental fruit fly，*Bactrocera*（*Bactrocera*）*dorsalis*（Hendel）. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*，12(6)：904 – 905. [梁广勤，梁帆，吴佳教，李惠河，2003. 桔小实蝇不育处理试验研究初报. 江西农业大学学报，12(6)：904 – 905].

Lin JT，Zeng L，Bin SY，Liang GW，Wu SH，2005. The construction and analysis of natural population life table of *Bactrocera*（*Bactrocera*）*dorsalis*（Hendel）. *Journal of Huazhong Agricultural University*，24(2)：138 – 142. [林进添，曾玲，宾淑英，梁广文，吴仕豪，2005. 桔小实蝇自然种群生命表的组建与分析. 华中农业大学学报，24(2)：138 – 142].

Pan ZP，Zeng L，Lu YY，2005. Monitoring of resistance of oriental fruit fly adults to insecticides in south China. *Journal of South China Agricultural University*，26(4)：23 – 26. [潘志萍，曾玲，陆永跃，2005. 华南地区桔小实蝇对几种农药的抗药性研究. 华南农业大学学报，26(4)：23 – 26].

Pan ZP，Zeng L，Wen SY，2006. Microsatellite DNA polymorphism in different pesticide-resistant strains of the oriental fruit fly. *Acta Entomologica Sinica*，49(5)：874 – 877. [潘志萍，曾玲，温硕洋，2006. 桔小实蝇抗性品系的微卫星 DNA 分析. 昆虫学报，49(5)：874 – 877].

Ren L，Lu YY，Zeng L，Pang ST，2006. Effect of different hostfruits on the cold hardiness of *Bactrocera dorsalis*（Hendel）（Diptera：Tephritidae）. *Acta Entomologica Sinica*，49(3)：447 – 453. [任璐，陆永跃，曾玲，庞淑婷，2006. 寄主对桔小实蝇耐寒性的影响. 昆虫学报，49(3)：447 – 453].

Tang ZH，1993. Insect Resistance to Pesticide and Its Management. China Agriculture Press，Beijing. 11 – 18. [唐振华，1993. 昆虫抗药性及其治理. 北京：农业出版社. 11 – 18].

Tang ZH，Wu SX，2000. Heredity and Evolution of Insect Resistance to Pesticides. Shanghai Scientech Document Press，Shanghai. 36 – 58. [唐振华，吴士雄，2000. 昆虫抗药性的遗传与进化. 上海：上海科技文献出版社. 36 – 58].

Xu YJ，Zeng L，Lu YY，Lin JT，2005. Ovipositional selection of the *Bactrocera dorsalis*（Hendel）to the different fruits. *Journal of Huazhong Agricultural University*，24 (1)：25 – 26. [许益镌，曾玲，陆永跃，林进添，2005. 桔小实蝇对不同水果产卵的选择性. 华中农业大学学报，24 (1)：25 – 26].

Yu X，Lu YY，Liang GW，Zeng L，Lin JT，2006. The spatial pattern of *Bactrocera dorsalis* males with geostatistics. *Journal of South China Agricultural University*，27(2)：28 – 31. [于鑫，陆永跃，梁广文，曾玲，林进添，2006. 桔小实蝇雄成虫空间分布的地理统计学分析. 华南农业大学学报，27(2)：28 – 31].

Yuan SY，Kong Q，Xiao C，Chen B，Yang SS，Zhang JB，Sun W，Li ZY，2005. Influence of temperature on development，survival and fecundity of *Bactrocera dorsalis* Hendel. *Journal of Huazhong Agricultural University*，24(6)：588 – 591. [袁盛勇，孔琼，肖春，陈斌，杨仕生，张建波，孙文，李正跃，2005. 温度对桔小实蝇发育、存活

和繁殖的影响．华中农业大学学报，24(6)：588－591]．

Zhang YP，Zeng L，Lu YY，Liang GW，2007. Monitoring of insecticide resistance of *Bactrocera dorsalis* adults in South China．*Journal of South China Agricultural University*，28(3)：20－23．[**章玉苹，曾玲，陆永跃，梁广文**．2007．**华南地区桔小实蝇抗药性动态监测．华南农业大学学报**．28(3)：20－23]．

Lin JT，Zeng L，Lu YY，Liang GW，Xu YJ，2004．Research advances in biology and control of *Bactrocera*（*Bactrocera*）*dorsalis*（Hendel）．*Journal of Zhongkai Agrotechnical College*，17(1)：60－67．[**林进添，曾玲，陆永跃，梁广文，许益镌，**2004．**桔小实蝇生物学特性及防治研究进展．仲恺农业技术学院学报**．17(1)：60－67]．

Zhao YX，Ming Y，1986．Survey on Fruit Flies at Fruits and Vegetables in Southern China．Report of Plant Quarantine Institute，Ministry of Agriculture，Animal Husbandry and Fishery，China．[**赵又新，明月，**1986．**我国南方果蔬实蝇的调查研究．农牧渔业部植物检疫实验所植物检疫研究报告**]．

Zhou GL，Ye J，Yuan P，2006．Reasons for *Bactrocera dorsalis*（Hendel）infestation in Shanghai．*Journal of Plant Quarantine*，2006(Suppl.)：44－46．[**周国梁，叶军，袁平，**2006．**桔小实蝇在上海局部暴发成因分析．植物检疫，**2006(**增刊**)：44－46]．

（责任编辑：赵利辉）